引用格式：王世金，康世昌，陈拓，等．长期海洋性冰川与环境监测研究支撑区域可持续发展．中国科学院院刊，2024, 39(3): 572-578, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240222002.
Wang S J, Kang S C, Chen T, et al. Long term monitoring and research on temperate glaciers and related environments provide technological support for regional sustainable development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(3): 572-578, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240222002. (in Chinese)

长期海洋性冰川与环境监测研究支撑区域可持续发展

王世金[1,2,3] 康世昌[1,2] 陈 拓[1,2] 何元庆[1,2] 杨梅学[1,2] 李全莲[1,2] 牛贺文[1,2] 蒲 焘[1,2] 张爲林[1,2,3]
车彦军[2,3] 郭万钦[1,2,3] 燕兴国[1,2,3] 马兴刚[1,2,3] 王荣军[1,2,3]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学与冻土工程重点实验室 兰州 730000
2 中国科学院玉龙雪山冰冻圈与可持续发展野外科学观测研究站 丽江 674100
3 米堆冰川-光谢错冰湖灾害西藏自治区野外科学观测研究站 林芝 860000

摘要 经过20年的发展，中国科学院玉龙雪山冰冻圈与可持续发展野外科学观测研究站已建成集观测、研究、示范与服务于一体的海洋性冰川与环境野外综合观测体系与数据在线可视化平台。该平台以海洋性冰川与环境长期定位监测为基础，围绕海洋性冰川区可持续发展关键科学问题，深入分析了海洋性冰川变化的过程机理，揭示了海洋性冰川变化的水文、微生物、气候效应，评估了海洋性冰川旅游服务成效与冰湖溃决灾害综合风险，研究成果为区域可持续发展提供了科技支撑。

关键词 长期定位监测，海洋性冰川与环境，区域可持续发展，冰冻圈科学

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240222002
CSTR 32128.14.CASbulletin.20240222002

全球海洋性冰川（温冰川），受海洋气候影响显著，对全球变暖响应敏感。玉龙雪山冰川位于青藏高原东南缘，因夏、秋季受南亚季风和东亚季风双重影响，其属性亦为海洋性冰川。我国海洋性冰川进入性相对便捷，且距四川、重庆等旅游客源市场较近，是冰川旅游开发较早区域，经济效益显著。然而，与大陆性冰川（冷冰川）相比，海洋性冰川受季风影响，冰温高、流速快，其冰川消退速率、属性变化更快、更强，其失稳风险及潜在影响更大。较小的温升和降水波动会导致强烈的冰川变化，其研究对于揭示全球

资助项目：国家自然科学基金面上项目（42371153、42371155、42071099）
修改稿收到日期：2024年2月26日

变化具有指示作用。为促使该区域可持续发展，对其冰冻圈与环境进行定位监测具有强烈的现实需求。

中国科学院玉龙雪山冰冻圈与可持续发展野外科学观测研究站（以下简称“玉龙雪山站”）位于云南省丽江市玉龙县白沙镇，始建于2006年，是我国第一个以海洋性冰川与环境为监测、研究对象的野外站。玉龙雪山位于青藏高原东南缘，是欧亚大陆距赤道最近、规模最大的现代冰川分布区，长期定位监测对于揭示低纬高海拔冰川变化的过程机理意义重大。经多年发展，玉龙雪山站在野外观测平台建设、海洋性冰川变化过程与机理、海洋性冰川变化的环境效应与影响、冰川旅游服务、冰湖溃决灾害等协同研究方面进展显著，研究成果在国内外产生了重要影响，极大地推动了冰冻圈与可持续发展协同研究进程，为统筹区域水资源优化配置、冰雪旅游资源开发与冰冻圈防灾减灾提供了理论依据与决策支持。

1 建成了中国海洋性冰川与环境综合观测网络体系

建站以来，在冰冻圈科学目标和国家重大社会需求牵引下，玉龙雪山站坚持“观测、研究、示范、服务”方针，逐步建成了“一站四区”（玉龙雪山站，梅里雪山、岗日嘎布、贡嘎雪山和达古雪山研究区）空间观测网络体系[1]，并强化了整个海洋性冰川区冰冻圈与可持续发展的协同观测与研究能力。其中，玉龙雪山观测体系包括海拔2 049—4 850 m的5个梯度式气象监测系统，1处冰川变化定位观测场，1套冰川实时监测系统，1套冰雪化学特征观测系统，2处冰川水文观测场，3处大气环境监测系统。其他4个研究区均布设有气象站、水文站，对其冰川、气象与水文进行定位监测。岗日嘎布研究区重点揭示冰川与冰湖相互作用机制，梅里雪山研究区重在明晰冰雪径流对地下水的补给作用，贡嘎雪山研究区旨在揭示表碛覆盖对冰川物质亏损的抑制作用，达古雪山冰川区重点关注冰雪消融过程对可持续旅游的综合影响。在此观测基础上，玉龙雪山站研发了冰冻圈与可持续发展数据可视化平台，实现了“一站四区”气象、冰川与水文观测数据的实时在线传输功能。

玉龙雪山站注重观测方法和数据资料的质量控制过程，加强与国家科技资源共享服务平台间的有机衔接，有序开展野外观测数据的汇交与共享，有效推动了科学设施、科学数据等科技资源的开放程度。

2 开展了白水河1号定位监测冰川与全球参照冰川物质平衡监测和对比研究

基于长期定位监测，建立了亚欧大陆距赤道最近、时间序列最长的海洋性冰川物质平衡数据集[2]，协同对比了全球参照冰川物质平衡，为区域水资源利用规划起到了重要作用。

自2008年，在玉龙雪山白水河1号冰川上布设物质平衡花杆，开展物质平衡的连续监测工作。利用等高线法、消融曲线法和大地测量法，分别计算2000—2010年间玉龙雪山白水河1号冰川多年平均物质平衡（－0.99、－1.01和－1.18 m w.e.），结果基本一致[3]。1952—2017年间，白水河1号冰川物质平衡波动变化明显，其物质平衡介于－1.94—2.26 m w.e.，冰川累计物质平衡为－27.45 m w.e.，表明过去几十年冰川物质亏损严重（图2）。在此基础上，揭示了海洋性冰川快速变化机理：冰川区固态降水减弱、冰体消融增加；冰川表碛覆盖率增加，降低了冰雪反照率；冰面破碎化增加了冰川消融面积；冰体温度快速升高；消融期粒雪盆液态降水增加[2]。20世纪50—60年代以来，中国海洋性冰川区岗日嘎布、达古雪山、玉龙雪山、梅里雪山冰川面积缩减率均超过了38%，远高于全国18%的平均水平[1]。1959—2015年间，海洋性冰川物质平衡变化剧烈，年物质平衡在－1.80—0.44 m w.e.区间波动，年平均物质平衡递减率为－0.037 m w.e./a。其中，白水河1号冰川、乌鲁木齐河源1号冰川和全

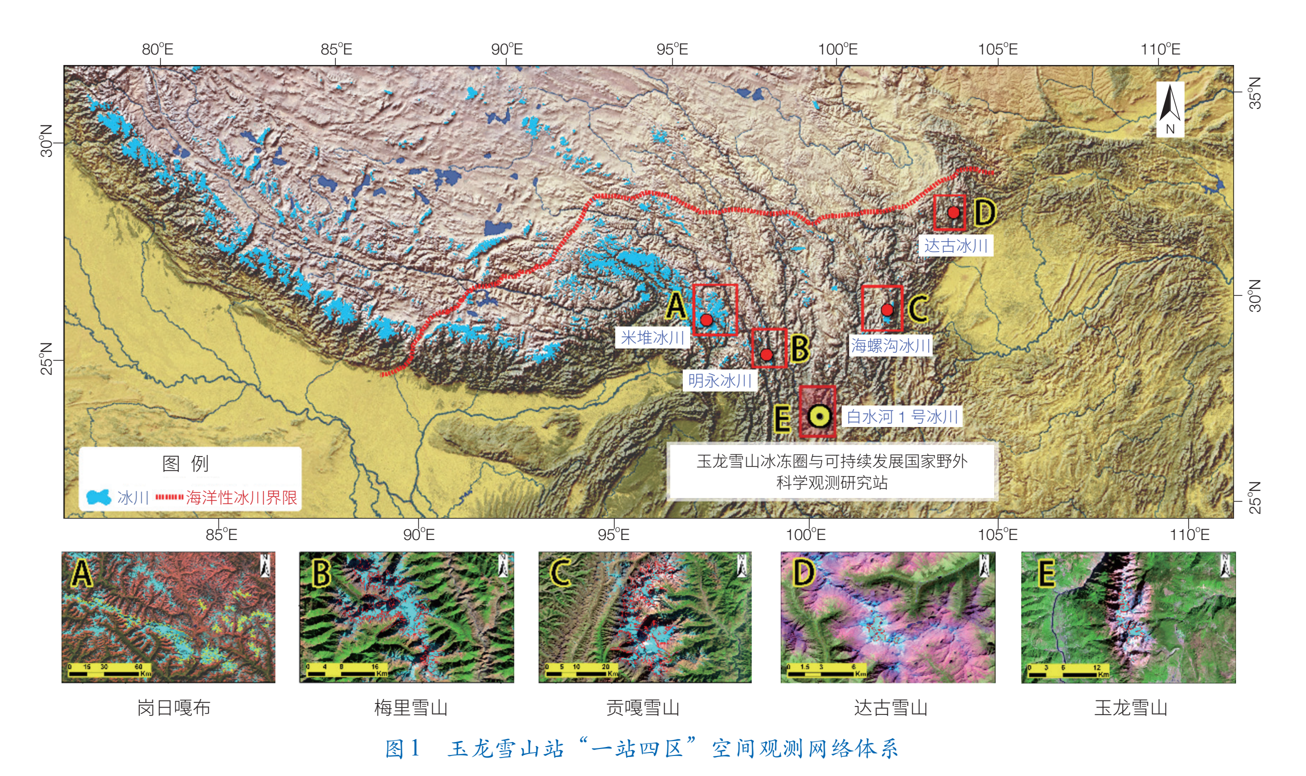


图 1　玉龙雪山站“一站四区”空间观测网络体系

Figure 1　Space observation network system of “One Station and Four Zones” from Yulong Snow Mountain Station

球参照冰川均有相似的冰川物质亏损趋势。在过去近 60 年间，平均物质亏损速率分别为 0.03 、0.02 和 0.01 m w.e./a。白水河 1 号冰川消融趋势明显快于乌鲁木齐河源 1 号冰川，同时也快于全球参照冰川物质亏损速率[1,2]。2022 年，白水河 1 号冰川仍处于物质严重亏损状态，物质平衡达 – 1.65 m w.e.。

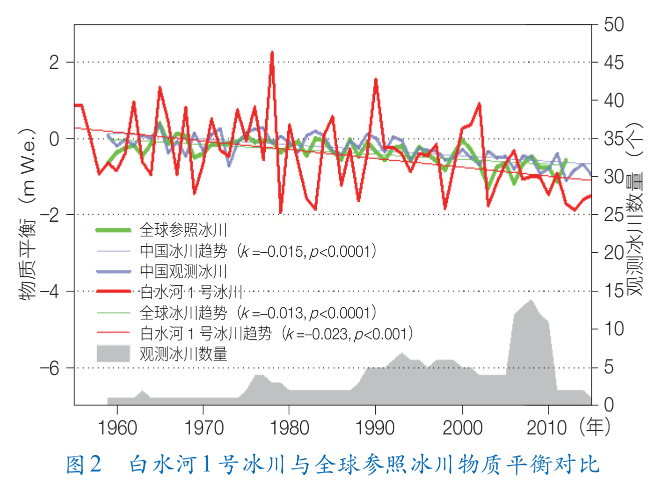


图 2　白水河 1 号冰川与全球参照冰川物质平衡对比

Figure 2　Comparison of mass balance between Baishui River Glacier No.1 and global reference glacier

3 揭示了海洋性冰川变化的水文、细菌微生物及其气候环境效应

（1）冰雪融水对地表径流及其地下水的补给作用。选取梅里雪山明永河流域、玉龙雪山白水河流域和漾弓江流域，结合气象、水文、同位素等数据，建立同位素径流分割模型，量化分析了不同流域冰雪融水对地表径流的贡献。结果表明，消融期（6—9 月）冰雪融水占明永河径流的 58.4%，非消融期地下水所占比例最高且相对稳定（60.0%）。季风前雪融水对白水河流域地表径流的贡献为 38.3%，季风期冰川融水对地表径流的贡献为 61.1%。季风前雪融水对漾弓江河水的贡献率为 47.9%，季风期冰川融水占漾弓江地表径流量的 6.8%[4]。采用质量平衡方程将明永河地下水分为冰川融水和雨水，发现降水和冰川融水对明永河流域地下水补给贡献分别为 54%±22% 和 46%±22%，发现了非季风降水主导季风海洋性冰川区地下水补给的新现象[5]。

（2）冰川及其退缩迹地细菌群落结构差异及其影响因素。冰川的低温、寡营养、强辐射等特征使其成为了一个天然、独特的微生物资源保藏库。不同生境（如雪、冰、融水、土壤、冰尘等）中的细菌群落存在着明显的差异。冰雪体细菌群落丰度通常低于融水、土壤、冰尘等生境。中国冰川雪坑中微生物数量、多样性、群落组成总体变化呈现“北高南低”、大陆性冰川细菌数量（可培养）高于海洋性冰川的特征。白水河1号冰川雪坑中的细菌数量随深度加大而升高，但其多样性和群落结构没有明显变化，优势类群主要为厚壁菌门、放线菌门等[6]。白水河1号冰川融水和退缩迹地土壤中的细菌群落都具有较高的多样性，但群落组成差异较大。融水中主要类群为变形菌门、厚壁菌门和蓝细菌门，而土壤中酸杆菌门、放线菌门、拟杆菌丰度也较高。土壤中的细菌群落多样性和群落结构相似度均高于融水，这种差异与环境理化特征的不同显著相关，其中总有机碳（TOC）、pH值、Fe等多指标对细菌群落有显著影响。协同对比全球典型冰川退缩迹地，发现细菌群落结构同时受到气候与地理格局的综合影响[7,8]。

（3）冰川吸光性杂质的气候效应。基于长期观测，分析了白水河1号冰川吸光性杂质含量的时空格局、化学转化、富集-淋溶过程与机制，揭示了吸光性杂质的气候效应，评估了黑碳（化石燃料和生物质不完全燃烧产物）对冰川消融的影响机制（图3）。在白水河1号冰川，随着积雪的持续消融，冰面黑碳和有机碳富集，其中黑碳富集更为显著。在不同吸光性杂质浓度情境下，冰面反照率降低的程度不同。其中，黑碳引起的雪冰反照率降低程度最高，在藏东南一些海洋性冰川中黑碳和粉尘可导致反照率降低15%。白水河1号冰川中黑碳对反照率降低的贡献约为10%，导致的辐射强迫可达145 W/m^2。总体上，黑碳对冰川反照率降低的贡献高于粉尘[9]。同时，估算了白水河1号冰川中溶解性有机碳含量为1.5 t，无机颗粒态碳7.25 t。这些吸光性杂质的沉降加速了冰川的消融。随着冰川消融，冰川中储存的碳被释放出来，冰川由“碳汇”向“碳源”转变[10]。

4 长期的监测、试验与研究结果有效服务于区域可持续发展

（1）基于仪器研发、试验示范与模型模拟，为景区旅游安全、景观美化及其水资源利用提供技术支

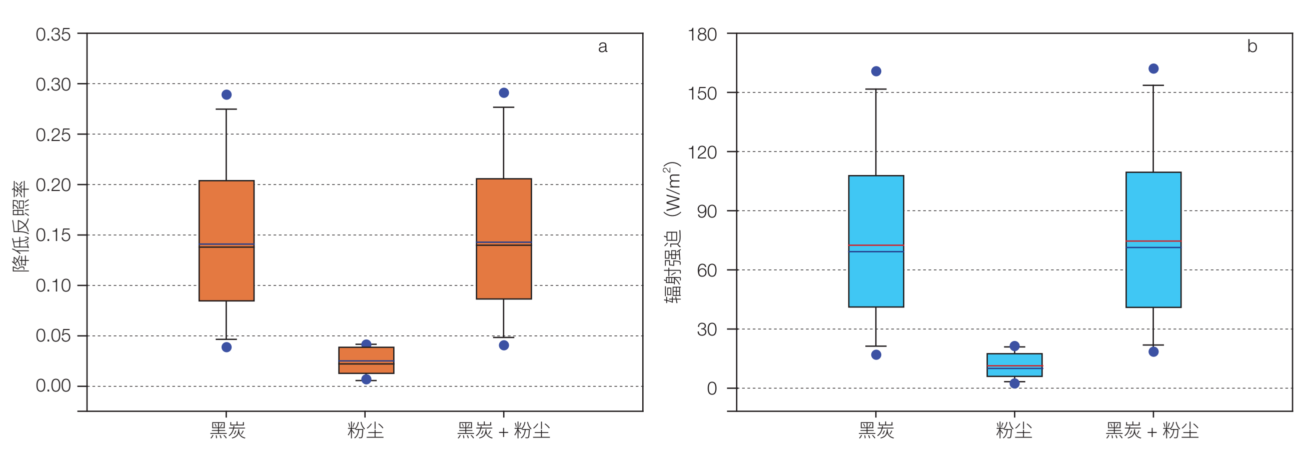


图3 雪冰中黑碳（BC）和粉尘（Dust）引起的青藏高原东南部冰川反照率降低及相应的瞬时辐射强迫（RF）

Figure 3 Spectral albedo reduction of surface snow on glaciers in the southeast of Qinghai-Tibetan Plateau caused by BC and dust in snow/ice and associated daily maximum radiative forcing (RF). Labels on x-axis indicate albedo reduction and associated daily maximum RF caused by BC, dust, and BC + dust in snowpack

撑。建成国内首个冰川实时监测系统，已对白水河1号冰川冰流速及其物质消融进行实时监测，该系统可为未来冰崩事件的发生提供早期预警[11]。联合丽江市玉龙县气象局开展冬春季人工增雪试验，成效显著，为减缓白水河1号冰川消融起到了积极作用。利用实测数据和水文模型，重建了白水河冰川径流深数据集，量化了海洋性冰川流域冰雪融水对地表径流-地下水的贡献率[4,5]，为区域水资源优化配置提供了理论参考。

（2）以海洋性冰川旅游服务研究为切入点，揭示了冰川旅游客源市场结构、旅游服务价值及其气候变化影响程度。发现冰雪旅游目的地客源核心市场由发展初期的近域客源市场向成熟期的远域客源市场拓展[12]。利用实地调查和旅行费用法，估算了玉龙雪山冰川旅游服务价值。经计算，玉龙雪山冰川旅游服务总价值为20.33亿—57.18亿元。2016年玉龙雪山冰川旅游服务价值仅18亿元，接近冰川旅游服务总价值最小值，冰川旅游服务提升空间很大。如果冰雪资源消失，至少损失20%—40%的客源[13]。研究成果为其他旅游目的地冰川旅游可持续发展提供了理论依据[14]。

（3）以海洋性冰川-米堆冰川长期监测为基础，综合现场考察、多源影像、无人机、无人船等多技术方法，系统揭示了典型冰湖溃决机理，提出了早期预警与中后期防灾减灾方案。发现，冰内水系溃决和冰川前进乃1988年光谢错溃决之主因[15]，而2020年嘉黎县金乌错冰湖溃决事件则由冰雪崩体、侧碛边坡失稳滑坡体和溃决前该地区持续降雨多因素所致[16]。在此基础上，综合评估了青藏高原潜在危险性冰湖溃决的灾害风险。建议加大海洋性冰川与冰湖相互作用机制的定位监测力度，同时应及早采取泄洪等工程措施以降低高危冰湖溃决风险[17]。

以上研究成果有效服务于区域水资源优化配置、冰雪旅游可持续发展及冰冻圈防灾减灾等重大社会需求。

5 结语

基于长期的定位监测与数据积累，以冰冻圈科学为引领，积极探索冰冻圈与可持续发展协同研究路径，在冰冻圈变化过程机理、冰冻圈变化的水文水资源效应、生态效应、气候效应及其影响，以及冰冻圈与可持续发展研究方面进展显著。研究结果积极推动和促进了冰冻圈化学、冰冻圈微生物、冰冻圈旅游学、冰冻圈灾害学、冰冻圈人文社会学等冰冻圈科学分支学科形成与发展[18-20]。

未来，玉龙雪山站拟利用高新技术和方法，以玉龙雪山站观测网络为基础，持续加强海洋性冰川与环境的长期监测，并在冰冻圈与可持续发展协同研究方向方面拓展，紧密围绕玉龙雪山站“冰冻圈变化过程机理、冰冻圈变化的环境效应、冰冻圈与可持续发展”三大领域方向，以冰冻圈变化与可持续发展关键科学问题为切入，综合评估不同时空尺度冰冻圈致利致灾效应，以提出冰冻圈影响区的可持续发展路径。

参考文献

1 Wang S J, Che Y J, Wei Y Q. Spatiotemporal dynamic characteristics of typical temperate glaciers in China. Scientific Reports, 2021, 11: 657.

2 Chen L H, Che Y J, Cao Y, et al. Glacier mass balance based on two digital elevation models and ground observation records for the Baishui River Glacier No. 1 in Yulong Snow Mountain, southeastern Qinghai–Tibet Plateau. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 883673.

3 Wang S J, Che Y J, Pang H X, et al. Accelerated changes of glaciers in the Yulong Snow Mountain, southeast Qinghai-Tibetan Plateau. Regional Environmental Change, 2020, 20 (2): 38.

4 Pu T, Qin D H, Kang S C, et al. Water isotopes and hydrograph separation in different glacial catchments in the southeast margin of the Tibetan Plateau. Hydrological Processes, 2017, 31(22): 3810-3826.

5 Kong Y L, Wang K, Pu T, et al. Nonmonsoon precipitation dominates groundwater recharge beneath a monsoon-affected glacier in Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(20): 10913-10930.

6 马晓军, 刘炜, 侯书贵, 等. 玉龙雪山冰川雪坑中细菌多样性群落结构及其与气候环境的关系. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 94-100.

Ma X J, Liu W, Hou S G, et al. Bacterial diversity and community at Yulong Snow Mountains and their relationship to climatic and environmental changes. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(6): 94-100. (in Chinese)

7 Sajjad W, Ali B, Bahadur A, et al. Bacterial diversity and communities structural dynamics in soil and meltwater runoff at the frontier of Baishui Glacier No. 1, China. Microbial Ecology, 2021, 81(2): 370-384.

8 Zhang B L, Wu X K, Zhang G S, et al. The diversity and biogeography of the communities of Actinobacteria in the forelands of glaciers at a continental scale. Environmental Research Letters, 2016, 11(5): 054012.

9 Niu H W, Kang S C, Wang H L, et al. Light-absorbing impurities accelerating glacial melting in southeastern Tibetan Plateau. Environmental Pollution, 2020, 257: 113541.

10 Niu H W, Kang S C, Wang H L, et al. Seasonal variation and light absorption property of carbonaceous aerosol in a typical glacier region of the southeastern Tibetan Plateau. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(9): 6441-6460.

11 Li L Y, Yang Y D, Wang S J, et al. Yearly elevation change and surface velocity revealed from two UAV surveys at Baishui River Glacier No. 1, Yulong Snow Mountain. Atmosphere, 2024, 15: 231.

12 王世金, 齐翠姗, 周蓝月, 等. 达古冰川旅游目的地客源时空结构特征、问题透视及其结构优化. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2019, 51(2): 58-67.

Wang S J, Qi C S, Zhou L Y, et al. Spatiotemporal characteristics and structural optimization of the tourist source market: A case study of Dagu Glacier as a tourist destination in a problem-based perspective. Journal of Yunnan Normal University (Humanities and Social Sciences Edition), 2019, 51(2): 58-67. (in Chinese)

13 Yuan L L, Wang S J. Recreational value of glacier tourism resources: A travel cost analysis for Yulong Snow Mountain. Journal of Mountain Science, 2018, 15(7): 1446-1459.

14 Wang S J, Xie J, Zhou L Y. China's glacier tourism: Potential evaluation and spatial planning. Journal of Destination Marketing & Management, 2020, 18: 100506.

15 Che Y J, Wang S J, Wei Y Q, et al. Rapid changes to glaciers increased the outburst flood risk in Guangxieco Proglacial Lake in the Kangri Karpo Mountains, Southeast Qinghai-Tibetan Plateau. Natural Hazards, 2022, 110(3): 2163-2184.

16 Wang S J, Yang Y D, Gong W Y, et al. Reason analysis of the Jiwenco glacial lake outburst flood (GLOF) and potential hazard on the Qinghai-Tibetan Plateau. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3114.

17 Wang S J, Che Y J, Ma X G. Integrated risk assessment of glacier lake outburst flood (GLOF) disaster over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP). Landslides, 2020, 17(12): 2849-2863.

18 陈拓, 张威. 冰冻圈微生物学. 北京: 科学出版社, 2022.

Chen T, Zhang W. Cryospheric Microbiology. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

19 康世昌, 黄杰. 冰冻圈化学. 北京: 科学出版社, 2021.

Kang S C, Huang J. Cryospheric Chemistry. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)

20 王世金, 温家洪. 冰冻圈灾害特征、影响及其学科发展展望. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 523-530.

Wang S J, Wen J H. Characteristics, influence of cryosphere disaster and prospect of discipline development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 523-530. (in Chinese)

Long term monitoring and research on temperate glaciers and related environments provide technological support for regional sustainable development

WANG Shijin[1,2,3] KANG Shichang[1,2] CHEN Tuo[1,2] HE Yuanqing[1,2] YANG Meixue[1,2] LI Quanlian[1,2]
NIU Hewen[1,2] PU Tao[1,2] ZHANG Binglin[1,2,3] CHE Yanjun[2,3] GUO Wanqin[1,2,3] YAN Xingguo[1,2,3]
MA Xinggang[1,2,3] WANG Rongjun[1,2,3]

（1 State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering,
Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2 Yulong Snow Mountain National Field Observation and Research Station for Cryosphere and Sustainable Development,
Chinese Academy of Sciences, Lijiang 674100, China;
3 Midui Glacier-Guangxie Lake Disaster Field Science Observation and Research Station of Tibet Autonomous Region,
Nyingchi 860000, China）

Abstract After nearly 20 years of development, the Yulong Snow Mountain National Field Observation and Research Station for Cryosphere and Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences has built a field comprehensive observation system and data online visualization platform of temperate glacier and environment integrating observation, research, demonstration, and service. Based on the long-term positioning monitoring of temperate glaciers and the environment, and focusing on key scientific issues related to sustainable development in temperate glacier areas, this study deeply analyzes the mechanism of changes in temperate glaciers, reveals the hydrological, microorganisms, and climatic effects of temperate glacier change, evaluates the effectiveness of temperate glacier tourism services and integrated risk of glacial lake outburst disasters, and provides scientific and technological support for regional sustainable development.

Keywords long term positioning monitoring, temperate glacier and environment, regional sustainable development, cryospheric science

王世金 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学与冻土工程重点实验室研究员，云南丽江玉龙雪山冰冻圈与可持续发展国家野外科学观测研究站站长，中国冰冻圈科学学会(筹)理事。主要从事冰冻圈与可持续发展协同研究工作。E-mail: wangshijin@lzb.ac.cn

WANG Shijin Research Professor of State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of Yulong Snow Mountain National Field Observation and Research Station for Cryosphere and Sustainable Development, CAS, Board of Directors at the China Society of Cryospheric Science. He mainly engages in cryosphere and sustainable development research. E-mail: wangshijin@lzb.ac.cn

■责任编辑：张帆